



Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ
Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος
9^ο Εξάμηνο: Ολοκληρωμένο Θέμα Υδραυλικού Σχεδιασμού

Υδρολογικές μελέτες, υδρολογικά μοντέλα και λοιπά μυστικά

Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

Νοέμβριος 2023

Υδρολογικές μελέτες

- **Το νερό ως πόρος**

- Εκτίμηση υδατικού δυναμικού, επιφανειακού (παροχές ποταμών) και υπόγειου (ανανεώσιμα αποθέματα) → ασαφής και παραπλανητικός ο διαχωρισμός
- Ζητούμενο: χρονοσειρές απορροής (γενικότερα, χρονοσειρές υδατικού ισοζυγίου σε κλίμακα λεκάνης/υπολεκάνης), συνήθως σε μηνιαίο ή ημερήσιο χρονικό βήμα
- Ανακατασκευή της υδρολογικής δίαιτας (**υδατικό ισοζύγιο** και βασικές συνιστώσες του) της λεκάνης ή εκτίμηση της εξέλιξής, είτε σε επίπεδο πρόγνωσης είτε για υποθετικά σενάρια μελλοντικών αλλαγών

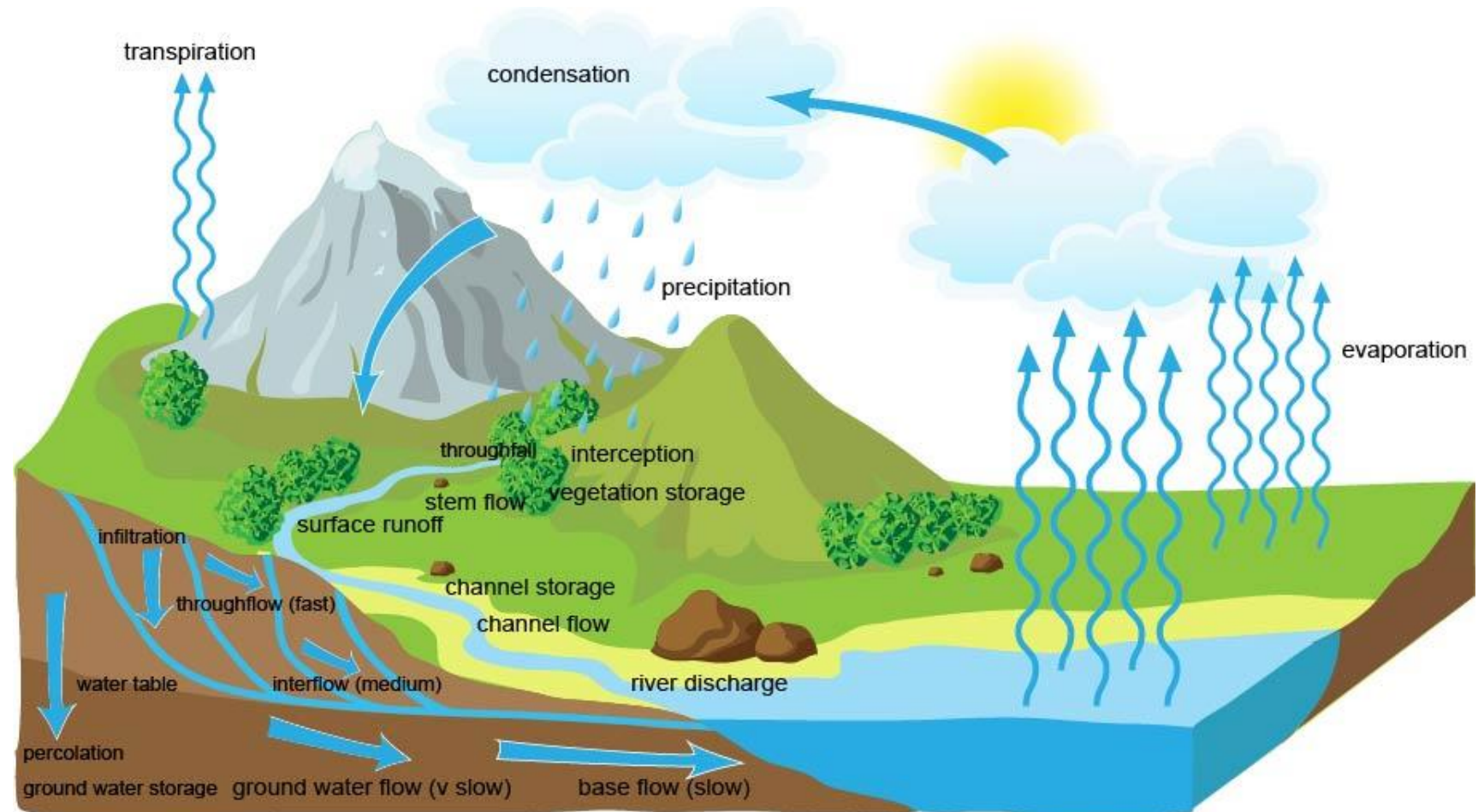
- **Το νερό ως κίνδυνος**

- Ανάλυση παρελθόντων πλημμυρικών επεισοδίων (μελέτες πραγματογνωμοσύνης)
- Σχεδιασμός έργων και διαχειριστικών σχεδίων-μέτρων (για υποθετικές πλημμύρες, που αναφέρονται σε δεδομένες περιόδους επαναφοράς)
- Υδρομετεωρολογική πρόγνωση (για επερχόμενες πλημμύρες)
- Ζητούμενο: χρονοσειρά παροχής σε κλίμακα επεισοδίου (πλημμυρογράφημα)

Υδατικό ισοζύγιο λεκάνης απορροής

Γενική σχέση: Βροχόπτωση (P) = μεταβολή αποθηκευμένου νερού (ΔS) + απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής (ET) + απορροή εξόδου (Q) + διακινήσεις υπόγειων νερών (ΔG)

- Σε μέση ετήσια κλίμακα: $\Delta S = 0$
- Αν δεν υπάρχουν υπόγειες εισροές ή εκροές: $\Delta G = 0$
- Βασικές συνιστώσες συνολικής απορροής:
 - Άμεση απορροή (ροή στο έδαφος)
 - Ενδιάμεση ή υποερμική ροή
 - Υπόγεια ή βασική απορροή (πηγές)



Μελέτη υδατικού ισοζυγίου σε κλίμακα λεκάνης απορροής

- **Απαιτήσεις σε δεδομένα**
 - Γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά λεκάνης
 - Σημειακές χρονοσειρές βροχόπτωσης και λοιπών μετεωρολογικών μεταβλητών (θερμοκρασία, κτλ.) σε σταθμούς της ευρύτερης περιοχής
 - Παραγωγή χρονοσειράς επιφανειακής βροχόπτωσης
 - Παραγωγή χρονοσειράς δυνητικής εξατμοδιαπνοής (π.χ. μέθοδος Penman-Monteith)
 - Υδρομετρικά δεδομένα
 - Χρονοσειρές στάθμης και συστηματικές υδρομετρήσεις → χρονοσειρά παροχής
 - Ταμιευτήρες: έμμεση εκτίμηση απορροής μέσω του υδατικού τους ισοζυγίου
- **Προβλήματα**
 - Δεν υπάρχουν υδρομετρικά δεδομένα ή υπάρχουν, αλλά σε άλλη θέση
 - Τα υδρομετρικά δεδομένα είναι ποσοτικά ή/και ποιοτικά μη επαρκή
 - Απαιτείται μεγαλύτερη εμβάθυνση στις διεργασίες της λεκάνης (+ χωρική λεπτομέρεια)

Υδρολογικά μοντέλα

- Γενική μαθηματική διατύπωση υδρολογικού μοντέλου:

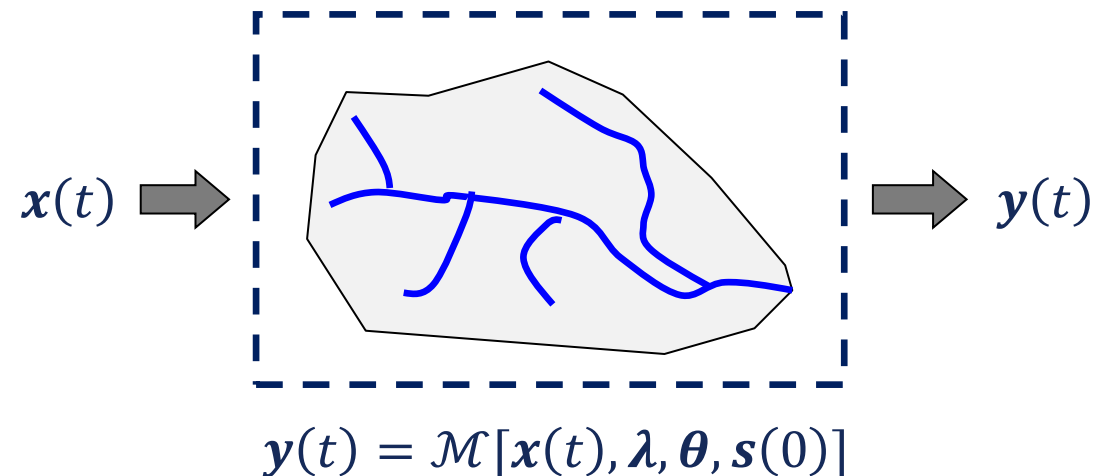
$$y(t) = \mathcal{M}[x(t), \lambda, \theta, s(0)]$$

όπου $x(t)$ οι μεταβλητές εισόδου (π.χ., χρονοσειρές βροχόπτωσης, θερμοκρασίας, κτλ.), $y(t)$ οι μεταβλητές εξόδου (χρονοσειρές απόκρισης, π.χ. απορροή, εξατμοδιαπνοή, αποθέματα), λ γνωστά χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις του μοντέλου (π.χ. έκταση λεκάνης), θ μη μετρήσιμα μεγέθη και συντελεστές εξισώσεων (παράμετροι), και $s(0)$ οι αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης (αποθέματα) στην αρχή της προσομοίωσης (αρχικές συνθήκες).

- Παράδειγμα: ορθολογική μέθοδος

$$Q = c i A$$

όπου Q η απόκριση του μοντέλου (παροχή αιχμής), i μεταβλητή εισόδου (ένταση βροχής), A χαρακτηριστικό μέγεθος (έκταση λεκάνης), και c παράμετρος (συντελεστής απορροής).



Πώς χτίζεται ένα (υδρολογικό) μοντέλο: Φιλοσοφική θεώρηση

Συλλογισμός (deduction)
Αίτιο → αποτέλεσμα

Γνωρίζουμε ή υποθέτουμε ότι η απορροή του ποταμού παράγεται από τη βροχόπτωση στη λεκάνη

Θεωρητικό μοντέλο



Παρατηρήσεις

Επιβεβαιώνεται ότι όταν βρέχει στη λεκάνη, η απορροή του ποταμού αυξάνει

Επαγωγή (induction)
Αποτέλεσμα → αίτιο

Έχει παρατηρηθεί ότι όταν βρέχει στη λεκάνη, η απορροή του ποταμού αυξάνεται

Παρατηρήσεις



Εμπειρικό μοντέλο

Διαμορφώνονται νόμοι εξάρτησης της απορροής του ποταμού από τη βροχόπτωση στη λεκάνη

Κατηγορίες υδρολογικών μοντέλων

Παρατήρηση 1: Δεν υπάρχει σωστό ή λάθος μοντέλο. Το κατάλληλο μοντέλο επιλέγεται κατά περίπτωση (με βάση το σκοπό της μελέτης, την εμπειρία, τα δεδομένα, κτλ.)

Παρατήρηση 2: “All models are wrong, some are useful” (George Box, 1976)

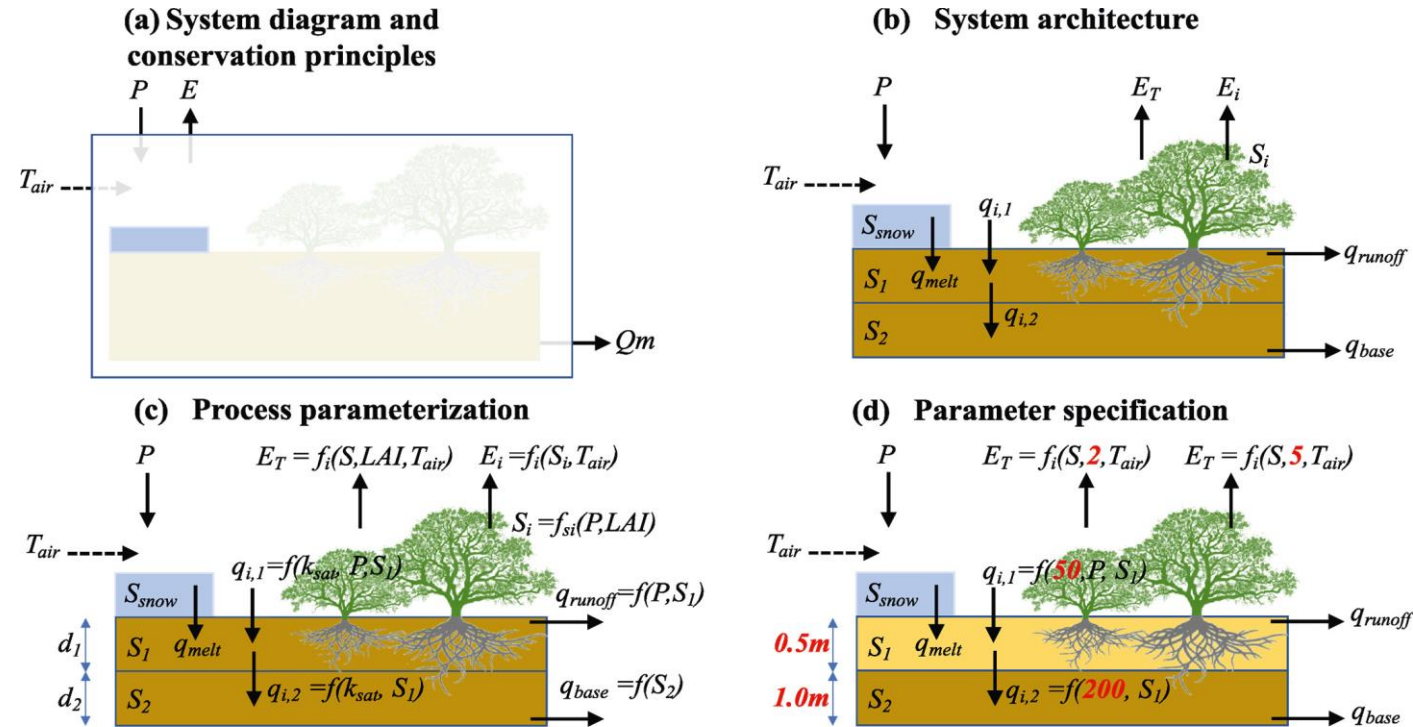
Κατηγορία μοντέλων	Μαθηματικό υπόβαθρο	Πλήθος και φυσική συνέπεια παραμέτρων
Φυσικής βάσης (physically-based)	Θεωρητικές εξισώσεις ροής, ημιεμπειρικές σχέσεις από πειραματικά δεδομένα	Πολύ μεγάλο πλήθος θεωρητικών ή μετρήσιμων (;) ιδιοτήτων πεδίου, με φυσική συνέπεια σε πολύ μικρή (απειροστή;) χωρική κλίμακα
Εννοιολογικά (conceptual)	Παραμετρικές σχέσεις σε απλοποιημένες δομές, που αναπαριστούν τις βασικές διεργασίες του συστήματος	Μικρός αριθμός παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν τα βασικά μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της λεκάνης
Στατιστικά ή στοχαστικά	Σχέσεις που αναπαράγουν την στατιστική δομή των παρατηρημένων δειγμάτων	Στοιχειώδης φυσική συνέπεια, ελεγχόμενη (από το μοντέλο) στατιστική συνέπεια
Συσχέτισης δεδομένων (data-driven) ή μαύρου κουτιού (black-box)	Μετασχηματισμοί των δεδομένων εισόδου για την εξαγωγή σύνθετων σχέσεων αιτίου-αποτελέσματος (π.χ. νευρωνικά δίκτυα)	Πολύ μεγάλος αριθμός μαθηματικών συντελεστών, χωρίς καμία φυσική ερμηνεία

Δομολογισμός

Επαγωγή

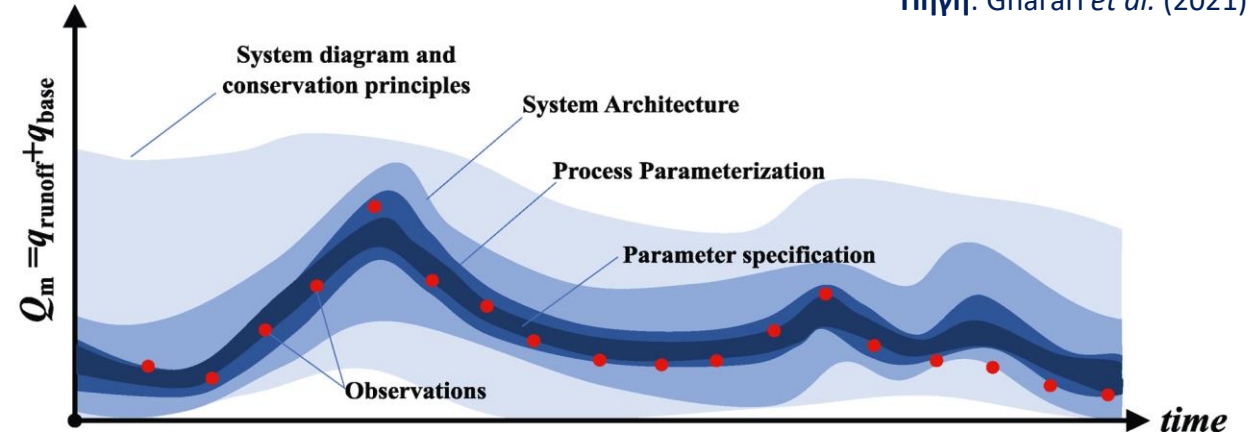
Πώς χτίζεται ένα εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο;

- Προσδιορισμός ορίων υδρολογικού συστήματος (γενική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου, μεταβλητές εισόδου)
- Αρχιτεκτονική μοντέλου (αποκρίσεις, εσωτερικές ροές, μεταβλητές κατάστασης)
- Παραμετροποίηση υδρολογικών διεργασιών (μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των ροών, που περιέχουν τις άγνωστες παράμετρος θ)
- Προσδιορισμός τιμών παραμέτρων
- Σταδιακή μείωση αβεβαιότητας



(e) Effect of various decisions on model simulations

Πηγή: Gharari et al. (2021)



Από εδώ ξεκίνησαν όλα: Μοντέλο Thornthwaite-Mather

Σύλληψη μοντέλου: Η λεκάνη απορροής λειτουργεί ως μια κλειστή δεξαμενή, χωρητικότητας K , το απόθεμα της οποίας αναπαριστά την αποθήκευση εδαφικής υγρασίας. Η δεξαμενή παράγει απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής και απορροή λόγω υπερχείλισης (κορεσμός εδάφους).

Χρονοσειρές εισόδου: βροχόπτωση, $P(t)$, δυνητική εξατμοδιαπνοή, $PET(t)$

Μαθηματική περιγραφή

- Όταν $P(t) \geq PET(t)$ παράγεται απορροή λόγω υπερχείλισης και καλύπτονται πλήρως οι ανάγκες της λεκάνης σε εξατμοδιαπνοή:

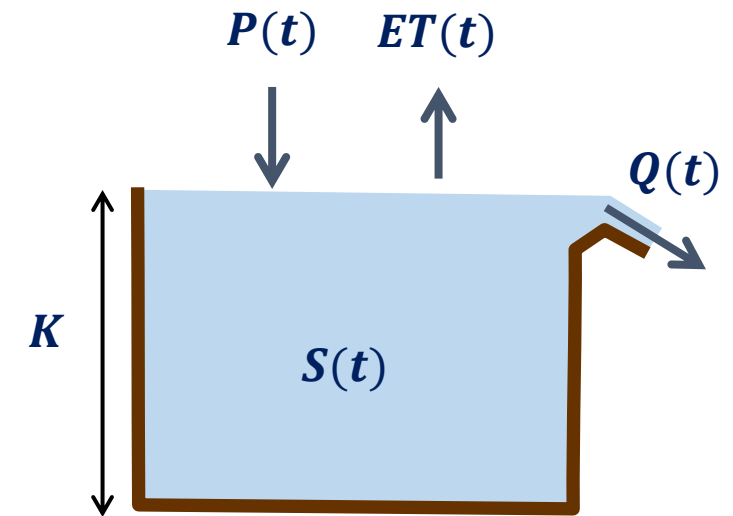
$$ET(t) = PET(t)$$

$$Q(t) = \max[0, S(t-1) + P(t) - ET(t) - K]$$

- Όταν $P(t) < PET(t)$ δεν παράγεται απορροή, ήτοι $Q(t) = 0$, ενώ η εξατμοδιαπνοή εκτιμάται από την εμπειρική σχέση:

$$ET(t) = P(t) + S(t-1) \left[1 - \exp\left(\frac{P(t) - PET(t)}{K}\right) \right]$$

- Στο πέρας του βήματος: $S(t) = S(t-1) + P(t) - ET(t) - Q(t)$

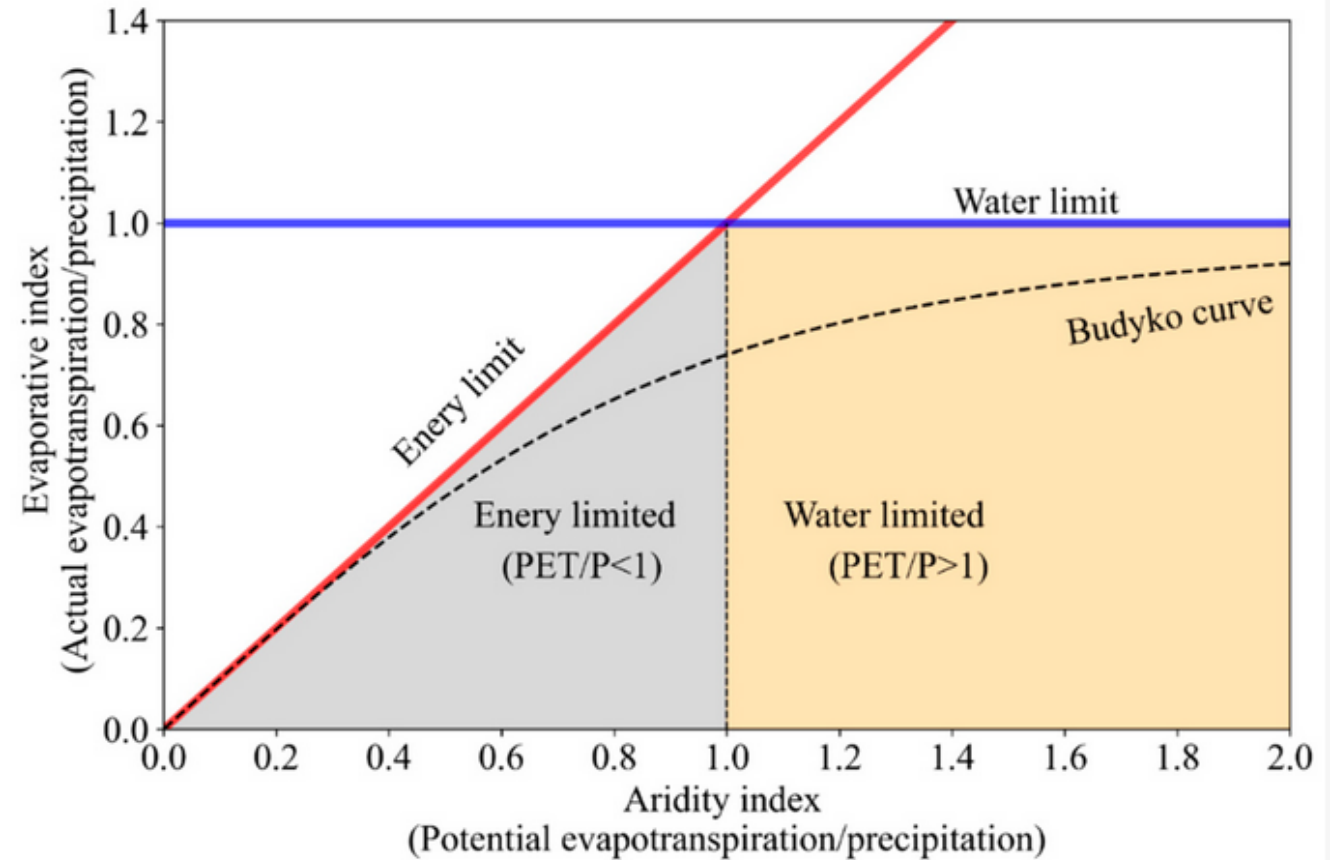


Πώς προσδιορίζεται η παράμετρος K ;

Μια μικρή στάση: Πραγματική εξατμοδιαπνοή

- Θεμελιώδεις περιορισμοί
 - $ET \leq PET$ (ενεργειακό όριο)
 - $ET \leq P$ (υδατικό όριο)
- Εμπειρικές σχέσεις σε μέση ετήσια κλίμακα (εξισώσεις Turk, Budyko κτλ.)
- Στα υδρολογικά μοντέλα, η πραγματική εξατμοδιαπνοή συνήθως επιμερίζεται σε **άμεση**, ET_d (εξάτμιση από υδάτινες επιφάνειες που δημιουργούνται από κατακράτηση της βροχόπτωσης) και **εδαφική**, ET_s (ως «άντληση» νερού από τη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας)
- Εφαρμόζονται σχέσεις της μορφής:

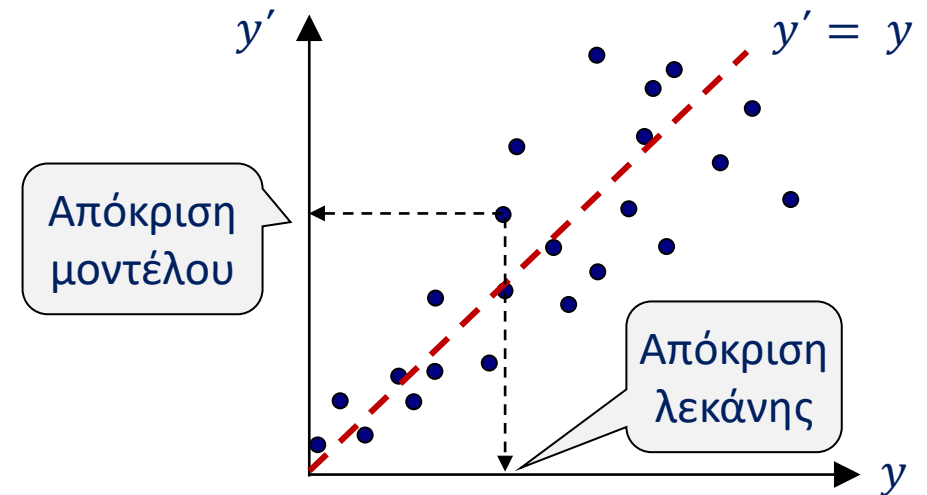
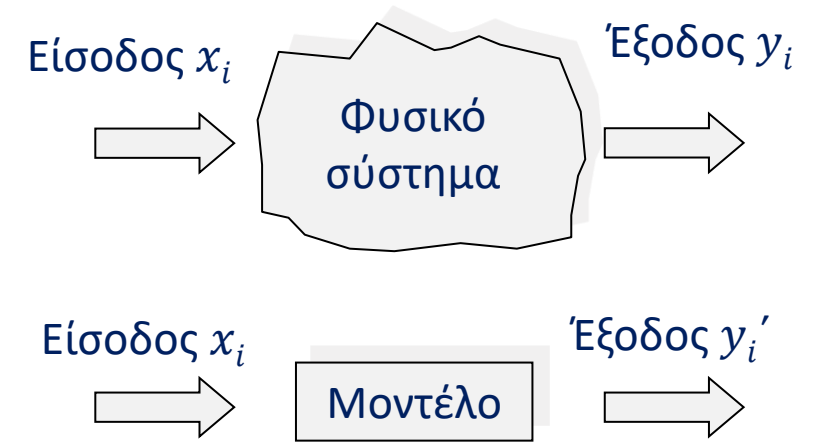
$$ET_s = f(PET - ET_d, S/K)$$



Γενική αρχή: Όσο πιο κορεσμένο το έδαφος, αυξάνει το ποσοστό κάλυψης των αναγκών σε εξατμοδιαπνοή από τη διαθέσιμη υγρασία

Εκτίμηση παραμέτρων

- Αδύνατη μέσω μετρήσεων πεδίου (το μοντέλα αναπαριστούν με εξαιρετικά μακροσκοπικό τρόπο τις υδρολογικές διεργασίες σε κλίμακα λεκάνης, δεν βασίζονται σε φυσικούς νόμους)
- Εμπειρική, ελέγχοντας την αληθοφάνεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου
- Χρήση τυπικών βιβλιογραφικών τιμών ή σχέσεων συσχετίσής του με φυσικά χαρακτηριστικά της λεκάνης (συνήθης προσέγγιση σε μοντέλα πλημμυρών)
- **Βαθμονόμηση** με βάση μετρήσεις των αποκρίσεων της λεκάνης (π.χ., παροχές) → πρόβλημα βελτιστοποίησης
 - Διατύπωση μέτρου καλής προσαρμογής του μοντέλου στις παρατηρήσεις
 - Επιλογή ορίων μεταβολής των παραμέτρων
 - Επαλήθευση του μοντέλου σε ένα ικανό πλήθος ανεξάρτητων παρατηρήσεων (διαχωρισμός δεδομένων σε δύο υποσύνολα)



Μέτρα καλής προσαρμογής



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}$$

Μέσο τετραγωνικό σφάλμα: Αν το σφάλμα υψωθεί σε μεγαλύτερη άρτια δύναμη, δίνεται έμφαση στην αναπαραγωγή των υψηλών τιμών των παρατηρήσεων

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2}$$

Αποτελεσματικότητα (efficiency, ή Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE): Συγκρίνει τη διασπορά του μοντέλου προς τη διασπορά των σφαλμάτων, λαμβάνοντας τιμές από $-\infty$ μέχρι 1 (τέλεια προσαρμογή). η μηδενική τιμή υποδηλώνει ότι η μέση τιμή των παρατηρήσεων, ήτοι η στοιχειώδης πρόγνωση $y'_i = \mu_y$, αποτελεί εξίσου καλή εκτιμήτρια με το μοντέλο

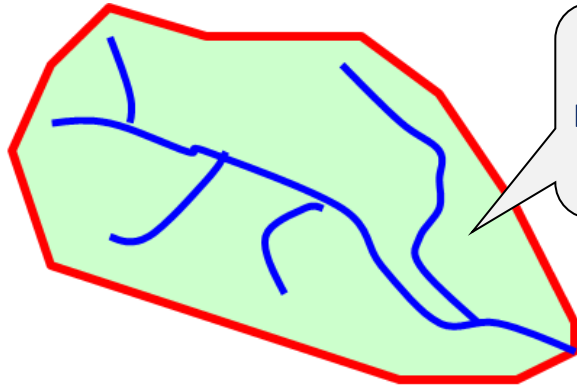
$$BIAS = \frac{\mu'_y - \mu_y}{\mu_y}$$

Μεροληψία (bias): Εκφράζει την απόκλιση της μέσης τιμής του μοντέλου σε σχέση με των παρατηρήσεων (στη γραμμική παλινδρόμηση, είναι εξ ορισμού μηδενική)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma'_y}{\sigma_y} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu'_y}{\mu_y} - 1\right)^2}$$

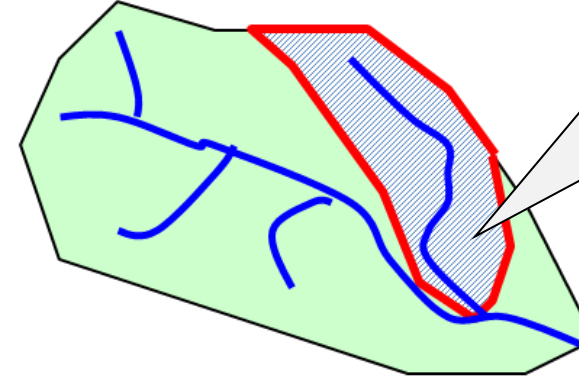
Kling-Gupta Efficiency: Εναλλακτική έκφραση της NSE, ελέγχει τρία στατιστικά χαρακτηριστικά (μέση τιμή, διασπορά, συντελεστής συσχέτισης)

Περιγραφή χωρικής ετερογένειας διεργασιών & παραμέτρων



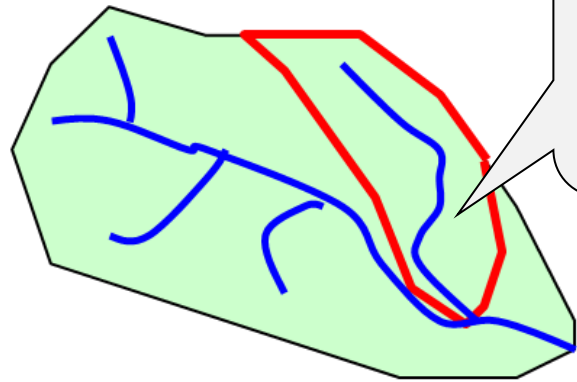
Κοινές φορτίσεις,
κοινές παράμετροι σε
όλη τη λεκάνη

Αδιαμέριστα (lumped)



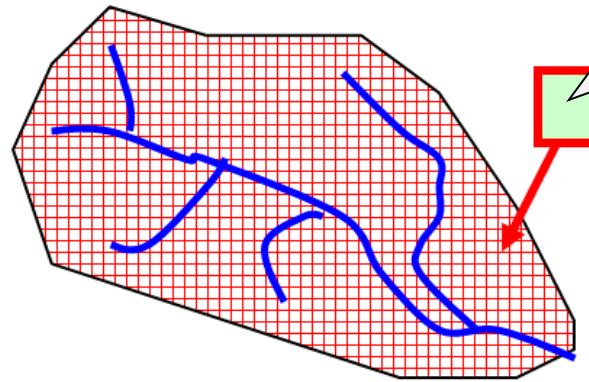
Διαφορετικές
φορτίσεις και
παραμέτροι
ανά υπολεκάνη

Ημι-κατανεμημένα (semi-distributed)



Διαφορετικές φορτίσεις
ανά υπολεκάνη, κοινές
παραμέτροι σε όλες τις
υπολεκάνες

Ημι-αδιαμέριστα (semi-lumped)



Διαχωρισμός σε
μικρές χωρικές
ενότητες (raster)

Κατανεμημένα (distributed)

Μονάδες υδρολογικής απόκρισης

- Ημικατανεμημένα μοντέλα: γιατί να διαφοροποιούνται οι παράμετροι ανά υπολεκάνη;
- Κατανεμημένα μοντέλα: τεράστιος αριθμός παραμέτρων → υπολογιστικός φόρτος → πρακτικά αδύνατη η βαθμονόμηση

- **Μονάδες υδρολογικής απόκρισης**

- Διαχωρισμός σε εδαφικούς τύπους, ανεξάρτητους από τα όρια των υπολεκανών (π.χ., με βάση γεωλογία, περατότητα, κάλυψη γης, κλίσεις).
- Εφαρμογή κοινών τιμών παραμέτρων ανά ΜΥΑ
- Διαμόρφωση τόσων ΜΥΑ όσων επιτρέπουν οι διαθέσιμες μετρήσεις
- Δυνατότητα **περιοχοποίησης** των παραμέτρων

